ENTOMOLOGIA

UEBER DAS INSEKTENAUGE

VON

LEOPOLD RICHTER

Ein Wissen vom Wirken der Sinne der Insekten ist schwer zu erlangen. Was von den Sinnen der Insekten als bekannt gilt, ist meist von eigenen auf jene gefolgert und uebertragen, also nur Annahme.

Es ist wohl auch toericht, bedenkt man die Verschiedenheit des Koerperbaues bei Insekten und Wirbeltieren, zu fordern, die jeweiligen Sinnesorgane und ihr Funktionieren moechten weniger unterschiedlich sein.

Ihres Aussenskelettes wegen sind die Insekten in ihrer Entwicklung in eine Sackgasse geraten. Denn die durch das Aussenskelett bedingte Tracheenatmung erlaubt nicht, wie bei den Wirbeltieren ein groesseres Koerpervolumen zu erlangen, was bedeutet, dass alle das Leben ermoeglichenden Organe auf ein Minimum an Zahl und Groesse und ein Maximum an Wirkung gebracht werden mussten. So sind Insekten in der Regel an eine bestimmte Nahrung gebunden, und jedes Abweichen davon ist fast immer unmoeglich.

Aber, trotz dieser physikalisch begruendeten Hemmungen, die in den langen geologischen Erdepochen nicht ueberwunden werden konnten, sind die Insekten die artenreichste Gruppe unter den Lebewesen. Rechnet man noch die sehr oft ungeheuerliche Individuenzahl ein, ist gezeigt, dass vor allen andern gerade die Insekten eine Faehigkeit besitzen, das Leben ueberragend zu meistern.

Nun ist bei der bedingten Kleinheit des Raumes, der ihre lebenswichtigen Organe aufzunehmen hat, besonders fuer das Hirn, das bei den Wirbeltieren in wachsendem Masse ausgebildet ist, nur venig Platz vorhanden. Eine Moeglichkeit, im Kopf zusaetzlichen Raum zu schaffen, ist nicht gegeben, weil die Statik des Tieres derartiges nicht erlaubt.

Da aber die Insekten, mehr als jedes andere Lebewesen, das Leben besonders gut gemeistert haben, muesste es nicht nur interessant, sondern auch wichtig sein, von den dazu fuehrenden Gruenden zu wissen. Deshalb ist es besonders notwendig, jene Organe des Insektes zu studieren, die mit der Umwelt die Verbindung herstellen und aufrechterhalten. Dass dies auf besonders wirkungsvolle Art und Weise geschieht, zeigt sich darin, dass der Vorteil aus so gewonnenen Wechselbeziehungen immer auf Seiten der Insekten ist. Und dies trotz ihrer, im Vergleich mit Wirbeltieren, raeumlich sehr eingeschraenkten Organe.

Vieles im Leben der Insekten stellt ein unserer Vernunft unvorstellbares Geschehen dar und wird meist mit dem nichtssagenden Wort (ohne Begriff) "Instinkt" abgetan. Auf diese Weise jedoch kann nie Erkenntnis gewonnen werden, wie dem Insekten "vernuenftiges" Tun moeglich ist und wie solches selbigem Insekten vorgestellt wird.

Es muss dieses Vorstellen grundsaetzlich von besonderer und verschiedener Sinnesentwicklung abhaengig sein, genau wie verschieden entwickelte Koerperstruktur verschiedenes Durchfuehren jeder Funktion bedingt.

Wuerde es gelingen, zu zeigen, dass gleich oder aehnlich gebaute Sinnesorgane, je nach dem Grad feststellbarer Differenzen, variierende Ergebnisse fuer das Leben der jeweiligen Traeger zeitigen, waere damit ein festes Mass zum Auseinandersetzen mit der Umwelt gewonnen. Das Ergebnis abgeaenderter aber gleichartiger Sinnesorgane muss dann in bestimmter Weise ebenfalls abgeaendert sein.

Diese so bestimmte Abaenderung aber stellt das gesuchte, wertschaetzende Urteil dar.

Die Methodik verlangt ein Untersuchen moeglichst vieler Lebewesen mit einem dem Menschen gemeinsamen Sinnesorgan, das aber irgend eine zusaetzliche Eigenheit besitzt. Aus dieser Verschiedenheit ist das korrespondierende Verhalten in beider entsprechenden Lebensaeusserungen festzustellen.

Das Netzauge der Insekten.

Beim Vergleichen der Struktur des Aussenskelettes der Insekten mit dem im Koerper eingebetteten Knochengeruest der Wirbeltiere, darf gefolgert werden, dass ein Sinnesorgan wie das Auge, trotz gleicher Grundaufgale, strukturell bedingte Funktionsunterschiede besitzen muss.

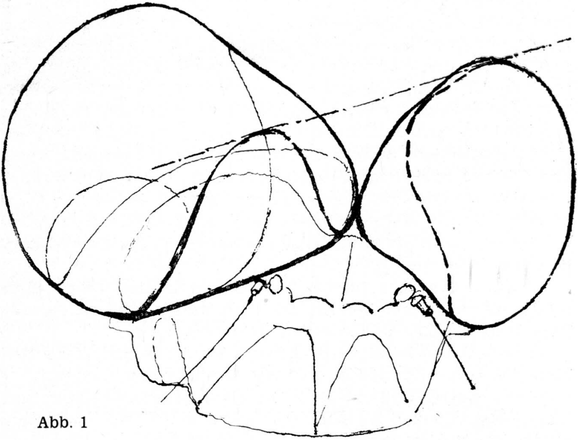

Abb. 1

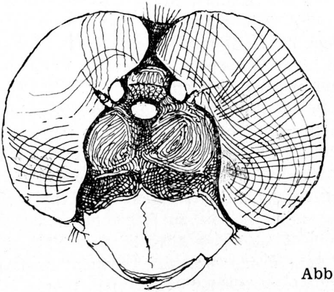

Abb. 2

Das Insektenauge hat unbewegliche Chitinlinsen als Teil seines Aussenskelettes. Mit diesen Linsen kann innerhalb bestimmter Grenzen gesehen werden. Es ist vorausgesetzt, dass Menschen- und Insektenauge ein Sehen gemeinsam haben: der Mensch schliesst sein Auge und oeffnet es wieder, er sieht nicht und sieht. Insekten hat man die Netzaugen mit schwarzer Farbe ueberstrichen, und aus dann sinnlosen Bewegungen geschlossen, dass sie nach dem Ueberstreichen blind geworden sind. Das Zusammengesetzt-, Netz- oder Facettenauge der Insekten, mit dem menschlichen Auge verglichen, stellt einen viel komplizierteren Apparat dar, und damit ist die gesuchte wesentliche Differenz zwischen den beiden Sehorganen gefunden. Mit diesen verschiedenen Sehorganen mit einer grundsaetzlich gleichen Aufgabe muss der Bauverschiedenheiten wegen ein so anderartiges Arbeiten bedingt sein, dass nicht einmal die Wahrnehmungsziele gleichartige sein koennen.

Insekten brauchen fuer ihre anpassungsfaehige Leben Sinnesorgane, die nicht nur hoechst reizempfaenglich sind, sondern diese Reize jederzeit fuer dies besondere Sein ausnuetzen.

Das Netzauge laesst seiner ausserordentlichen und komplizierten Bauweise wegen eine ebenso geartete Arbeitsweise vermuten.

Seine starre Chitinhuelle in Form aneinandergereihter Linsen erlaubt ohne Zweifel ein Sehen nur auf eine bestimmte und unveraenderliche Entfernung.

Die heute noch vermutete Ansicht, das Insekt sehe mit dem Netzauge einen Gegenstand mosaikartig, also zusammengesetzt aus kleinen Teilen und erziele damit eine genuegende Genauigkeit im Erkennen eines Gegenstandes, ist wenig einleuchtend (technisch auch unmoeglich). Mit sphaerisch angeordneten Ommatidien und ihren von einem Zentrum aus gerichteten Sehachsen koennen von einem ebenflaechigen Koerper im besten Falle nur sehr kleine Zonen deutlicher gesehen werden.

Durch die Starrheit der Linsen bedingte Sehgrenzen verringern noch mehr die Moeglichkeit, irgendwelche Dinge einer beliebigen Umwelt deutlich erkennen zu koennen. Es werden immer nur kleine und zufaellige Stuecke aus vielen heraus sich ohne Zusammenhang in einem Sehzentrum abbilden und mit solchen Teilen ist nichts anzufangen. Daraus ist zu entnehmen: das Sehen irgendwie gestalteter Umwelt ist keine Aufgabe fuer Netzaugen.

Ein Sehen, das wahrzunehmende Gegenstaende in viele kleine Teile zerlegt, waere bei langsamen Insekten ein, wenn auch kaum verstaendlicher, Notbehelf (Ameisen). Aber gerade im freien Luftraum

schnell fliegende Insekten besitzen die groesste Ommatidienzahl. (Libellen, Bremen).

Beachtet man bei den Lebewesen allgemeine Einrichtungen (das Netzauge gehoert zu den allgemeinsten), ist festzustellen: Erlangen maximaler Wirkung bei minimalem Materialaufwand. Diese Oekonomie muesste zudem bei zu aeusserster Sparsamkeit gezwungenen Insekten konsequenter durchgefuehrt werden, als bei allen uebrigen Lebensformen.

Die komplizierte Bauweise des Netzauges bedingt einen grossen Materialaufwand, der gelegentlich ein Sechstel des restlichen Koerpergewichtes ausmachen kann. Dies kann nicht mit einem schlechteren Sehvermoegen als solches, wie es mit einem billigen Auge bei den Wirbeltieren erreicht ist, gerechtfertigt werden.

Die Laenge der Ommatidien im Vergleich zum Durchmesser des ganzen Augenkomplexes ist nur gering.

Das Netzauge gleicht einer starkwandigen Hohlkugel, die soviele Nervenstraenge zu umschliessen hat, als sie Ommatidien besitzt. Die Sehachsen der Ommatidien strebten einem gedachten Mittelpunkt zu, waere die Form des Netzauges eine geometrische Kugel. Aber aus Gruenden spezifisch sehr verschiedener Lebensweisen ist die Kugelgestalt des Netzauges immer deformiert durch Abflachungen, Ausbuchtungen, Einsenkungen und dergleichen mehr. (Abb. 1 u 2.) Die Querschnitte variieren von angenaeherter Kreisform bis zu ebensolchen Ellipsen, die beide den Hohlformen des Auges entsprechend geometrisch gesehen, willkuerlich unregelmaessig erscheinen.

Wichtig ist zu erkennen, wie die genannten Unregelmaessigkeiten der geometrischen Formen bei den Netzaugen (hier bezogen auf Libellen) immer durch besondere Lebensforderungen bedingt und mit diesen in Einklang zu bringen sind.

Die Ommatidien -Sehachsen streben vorgestellten Kugelmittelpunkten zu, die im Falle von Unregelmaessigkeiten der Aussenhaut (die die Lage der Ommatidien bedingt) dezentralisiert sein muessen. Diese Unregelmaessigkeiten, als arteigene Abweichungen von gedachten rein geometrischen Oberflaechen, bedingen nun ein derartiges Verschiedengerichtetsein der einzelnen Ommatidien, dass sich jedes groessere Objekt als absurdes Zerrbild darstellen muesste.

Da tatsaechlich die spezifisch festgelegte Gesamtform des Netzauges zwangslaeufig die Sehwinkel der einzelnen Ommatidien bestimmt, ist die von jedem einzelnen Ommatidium erfasste Sehzone eine spezifisch bedingte, deshalb auch zugleich eine kontinuierlich veraenderliche Groesse.

Vom Lebendigsein aus gesehen ist die so zerkruemmte Aussenflaeche mit ihren Linsen ein wirkungsvolles und feines Mittel artlicher Anpassung an ganz besondere und schwierige Lebensweisen. Diese sind dann aber fuer das Insekt bedingend, denn wird seine Umwelt irgendwie zerstoert, ist dort eine weitere Leben-Erhaltung unmoeglich.

Sehen ist Mittel zum Leben und ermoeglicht Erkenntnis (empirisch begruendet) vermittels beigeordneter Sinnesorgane. Ein stumpfes Abbilden kann nicht genuegen, vom Abgebildeten muss irgendwie das auf das Leben Bezuegliche herauserkannt werden.

Wie Erfahrung entsteht, ob vom Erfahrenen auf die Form geschlossen oder von dieser aus nach entsprechenden Lebensmoeglichkeiten gesucht wurde, ist bei dieser Untersuchung belanglos. Hier genuegt zu zeigen, auf welche Art Sinneseindruecke zum Bewusstwerden vorgetragen sind. Artbedingt geformte Netzaugen legen Sinneseindruecke nicht wahllos vor, sondern uebertragen nur das, was zur Lebenerhaltung, sei es noch so spezialisiert, zu sehen notwendig ist.

Hiermit ist fuer die Insekten mindestens eine bedeutende Raumersparnis gewonnen, die, wie gesagt, ein Hauptproblem des Insektendaseins ausmacht, allerdings ewig (geologische Erdepochen als Beweis) auf Kosten aller Moeglichkeiten, die Erkenntnis allgemeiner Art in sich birgt. Oder: das Insekt wird immer nur das sehen, was zu sehen fuer sein Leben unerlaesslich ist. Dieses Unerlaessliche aber in groesster Vollkommenheit.

Eine kleine Libelle im Amazonaswald, unweit dem alten Ort Tabatinga oder dem juengeren Leticia, legt ihre Eier in das nieversiegende Wasser eines Bromelien-Blattkelches. Zahlreiche Schnakenlarven bewohnen immer diese zwei bis sechs Liter Wasser fassenden lebendigen Gefaesse. Die Libellenlarven naehren sich von den Schnakenlarven und die gefluegelten Libellen verfolgen im Flug die Mosquiten. Diese pflegen aber nur in der Daemmerung auszuschwaermen, so dass die jagenden Libellen gezwungen sind, sich bei geringem Licht auf kurze Entfernungen und auf kleine, unregelmaessig, wenigschnellfliegende Beute zu spezialisieren. Genau diesen Bedingungen entsprechend ist das Auge dieser Libelle ausgebildet: kugelfoermige Netzaugen, grosse Ommatidia mit stark gekruemmten Linsen, kleiner wendiger Koerper, der zu rastlosem Hin-und Herfliegen in engbegrenztem Raum befaehigt ist. Die Ommatidien koennen bei kargem Licht nach allen Seiten hin und auf kurze Entfernung sehen.

Die Umwandlung reiner Anschauung in Erfahrung oder empirische Anschauung kommt einer Abstraktion der Anschauung gleich, die beim Menschen Aufgabe des Verstehens ist.

Verstand hat die Faehigkeit, Vorstellungen zu erfassen, Vernunft, solchen Vorstellungen Begriffe hinzuzufuegen.

Beim Vorstellen von Raum und Zeit ist vom Insekt verlangt zu abstrahieren, denn fuer ein Lebewesen mit starren Linsen sind solche Begriffe aus einer unmittelbaren Anschauung nicht zu gewinnen. Und eine Abstraktion ist jedem Insekten, wie gezeigt, unmoeglich.

Dies ist, eng umrissen, das Problem des Sehens mit dem Netzauge: abstrakte Begriffe, wie Raum und Zeit, trotz der Unmoeglichkeit einer Vorstellung, auf rein mechanische Art wenigstens fuer die Lebensnotwendigkeiten der Netzaugentraeger zu gewinnen. Kein Gegenstand ist dreidimensional vorstellbar, es sei denn im Raum, also muss der Raum erfassbar, fuer das Insekt sichtbar gemacht werden.

Wird ein Objekt durch einen Sehmechanismus der Wahrnehmung uebermittelt, muessen bewegliche Linsen nacheinander und Stueck um Stueck die dritte Dimension als zunehmende Entfernung abtasten, also sich einstellen koennen.

Mit einem Netzauge ist dies nicht moeglich ebenfalls ist es ausgeschlossen die Zeit zu erfassen wegen der Unmoeglichkeit des Hintereinandersehens mit den starren Linsen.

Erfuellt trotz der starren Linsen und damit der Unmoeglichkeit eines raeumlichen Sehens das Netzauge die Aufgabe: in Raum und Zeit Wahrnehmung zu uebermitteln, so hat es ein Vernunftsergebnis erreicht, ohne Vernunft zu besitzen. Damit waere die Aufgabe geloest: Organe mit viel Gewicht einsparen und trotzdem deren Leistungen, soweit lebenswichtig, einwandfrei schaffen.

Das Netzauge ist ein mechanischer Weg, die Begriffe Raum und Zeit fuer lebenswichtige Zwecke vorstellbar zu machen.

Die starre Oberflaeche des Netzauges ist aus aneinandergefuegten Ommatidien gebildet, deren Zahl mit der Fluggeschwindigkeit des Netzaugentraegers zunimmt.

Bremen (Tabanidae) und Libellen haben oft zehntausend Ommatidien und darueber. Das zeigt an, dass die Ommatidienanzahl mit der schnellen Bewegungsfaehigkeit dieser Insekten in bestimmtem Zusammenhang steht. Alle schnellfliegenden Insekten fliegen im freien Luftraum, kein Hindernis hemmt ihren Flug. Libellen finden dort ihre ebenfalls schnelle Beute und es muss fuer sie lebenswichtig sein, diese sicher und schnell zu fangen, denn ohne fortwaehrendes Ernaehren waere ihr energieverzehrender Flug nicht durchfuehrbar.

Vom reinen Sehen aus ist es dabei gleichgueltig, fliegt das Netzaugen besitzende Subjekt, das Objekt oder beide; nur ein bewegungsloses Objekt koennte nie gesehen werden.

Beobachtungen ergaben, um dies beweisend zu zeigen, dass bei grundsaetzlich verschiedenen Lebensbedingungen sehr verschiedene Netzaugen verfuegbar sind. Kleine Libellen, die auf Wasserpflanzen treibend nur den Raum ueber sich sehen, haben oberseitg ihres Kopfes halbkugelig ausgebildete Netzaugen. Die Ommatidien haben stark gekruemmte Linsen, mit denen sie einen beschraenkten Raum uebersehen koennen. Diese Libellen koennen auch, ihrer Kleinheit wegen, keine ausgedehnten noch schnelle Fluege unternehmen, sie fangen nur kleine Insekten, die weder schnell noch entfernt ueber der Pflanzendecke des Wassers fliegen.

Die Seh-Reichweite ist der starren Linsen wegen innerhalb einer Art einheitlich. Die Ommatidienlinsen sind arteigen je nach Seh-Notwendigkeit gekruemmt: Libellen, die im freien Luftraum ueber den waldlosen Llanos zwischen Anden und Orinoco jagen (schnellfliegende Tabanidae), haben sehr flache Ommatidienlinsen im Gegensatz schon erwaehnter, die ihre Beute auf kurze Entfernungen sehen muessen, deren Linsen stark gebogen sind.

Spezialisierte Jagdweisen zwingen in bestimmter Umwelt lebende Libellen, ihre Beute zu ganz bestimmten Stunden des Tages zu jagen. Auch das Fliegen gewisser Libellen nur waehrend weniger Wochen im Jahr ist ganz vom Verhalten ihrer Beutetiere abhaengig.

Bei Ueberschwemmungen, die keine festen Zeiten einhalten, fliegen jagende Insekten nur bei bestimmtem Wasserstand und verraten auf diese Weise biologische Daten, die auf jedem andern Weg schwer erlangbar waeren. Treten endlich aussergewoehnliche Stoerungen ein, die regional begrenzt sind, wandern grosse Libellenschwaerme nach weithin aus, sich geeignetere neue Jagdgebiete zu suchen, was im Amazonaswald nicht schwer sein duerfte.

Die immer sphaerische Gestalt des Netzauges mit seiner unveraenderlich eingegrenzten Sehweite uebermittelt dem Sehzentrum beim Flug im freien Luftraum, diesen Raum in Form einer hellen grenzenlosen Flaeche.

Auf dieser Flaeche muss sich alles wahrnehmbare Geschehen abspielen. Die Libelle, als Traegerin hochentwickelter Netzaugen-Sehapparate, ist im Raum der lichtumflutete Mittelpunkt einer eigenen Welt, die den Flug begleitet, sich aber mit einer "absoluten" Welt auseinanderzusetzen hat.

Es ist sehr bezeichnend, dass gerade solche Libellen, kommen sie zum Ruhen in Bodennaehe, dabei in sichtliche Schwierigkeiten ge-

raten. Denn die Erdnaehe stellt fuer sie eine ungewohnte und schwierige Welt dar, sie suchen sich zum Niederlassen immer einen freiragenden Gegenstand aus und die Libellen naehern sich derart, dass er sich dunkel gegen einen hellen Hintergrund abhebt. Es sind dann meist, wie leicht zu beobachten ist, einige tastende Versuche notwendig, bis das Sichniederlassen gelingt.

Dagegen sind der Flug im freien Luftraum und das Erbeuten eines kleinen Insektes schnell und sicher. In hemmungslosem Flug wird in praeziser mathematischer Kurve auch die schnellste und kleinste Beute erjagt. Und dieses Fangen-Koennen ist die Aufgabe, die mittels der komplizierten Netzaugen zu loesen ist. Eine Aufgabe, die mit wenigen Einzelaugen auszufuehren unmoeglich ist.

Ein Libellen-Jagdgebiet umgebende Waelder, Baeume oder sonstige Gegenstaende koennen im Sehbereich der Netzaugen nie in anderer Weise erscheinen, als verschieden helle, moeglicherweise als verschieden farbige Flecke.

Libellenarten dagegen, mit Netzaugen, die zusammengommen von einer einfachen Kugelgestalt oder deren Annaeherung abweichen, jagen nie im freien Luftraum. Es sind dies Netzaugen, die schon auf einer Kopfhaelfte groesser als eine Halbkugel sind und, um dies ueberhaupt zu ermoeglichen, auf Stielen sitzen. (Mecistogaster-Pseudostigmatidae, Nesobasis-Coenagriidae). (Abb. 3). Solche Netzaugen bedingen eine andere Sehart, ein verschiedenes Fliegen und ein Verweilen in neuer Umwelt. Diese stielaeugigen Libellen leben im tropischen Suedamerika nur in dichten Waeldern. Ihre ganze Gestalt ist in jeder Einzelheit Ausdruck des Lebenmuessens und Lebenkoennens im dichtbelaubten Urwald.

Ein grotesk langer und duenner Leib (um die zwoelf Zentimeter lang und duenn wie eine Stricknadel) erlaubt diesen Libellen, ihre Eier in jede wassergefuellte Astaushoehlung zu legen.

Jagend fliegt die Libelle mit wirbelndem Fluegelschlag senkrecht und mit waagrecht getragenem Leib gemaechlich langsam auf-und-nieder. Jetzt haben die Netzaugen stark gekruemmte Linsen, mit welchen auf nur kurze Entfernung gesehen werden kann. Die Fluegel sind glashell durchsichtig, nur im Apikalwinkel der langen schmalen Vorderfluegel befinden sich lebhaft, meist gelb, weiss oder dunkelblau gefaerbte Flecke.

Die Haltung des langen, duennen Abdomens und die wirbelnden Fluegel, die den eigenartigen Senkrechtflug ermoeglichen, machen diese Libellen zu Hubschraubern, deren technisches Prinzip sie genau verkoerpern.

Der Fluegelschlag ist derart langsam, dass die farbigen Endflecke im Kreiswirbel als ein hin-und-herschwingendes Farbiges, als Einziges von der Libelle im lichtarmen Wald auf kurze Entfernungen auffallend sichtbar ist.

Im Laub still sitzende Insekten —die Libelle fliegt immer sehr nahe jenem Laub, das Staemme umrankenden Gewaechsen eigen ist— werden durch diese bewegten Farbflecke zu Bewegungen verleitet; aber die geringste Bewegung bedeutet, der suchenden Libelle sichtbar werden.

Somit beweisen auch diese Beobachtungen, dass das Netzauge das Werkzeug ist, im Sehraum befindliche bewegte Objekte sichtbar und in diesem Falle auf abgewandelte Art, erfassbar zu machen.

Das Netzauge, ein Mechanismus zur automatischen Zeiterkenntnis: Schnellfliegende Insekten, die andere im Raum fliegende zur Ernaehrung erbeuten muessen, haben einen genau so grossen Sehraum, dass die eigene Flugfaehigkeit genuegt, um in der Zeit, die ein Beutetier im Sehraum verweilt, eine Verfolgung (mit mitgetragenem Sehraum) anzutreten. Oder von der Beute aus: je schlechtere Fluchtmoeglichkeit, um so groesseren Sehraum muss der Sehmechanismus verschaffen, also eine Flucht-Zeit.

Die Netzaugen gewisser Fliegen (Otitidae, Gattung Richardia) haben voneinander Abstaende entwickelt, die die Koerperlaenge der Fliege uebertrifft. Dieser Abstand ist beim Maennchen bis zur Grenze des statisch Moeglichen ausgebildet.

Solche extremen Erscheinungen bei den Insekten bilden geeignete Beispiele, sich eine Vorstellung vom vielseitigen Wirken der Netzaugen zu machen.

Beobachtet man die Lebensweise dieser Fliegen, was dieser langgestielten und weitgetrennten Augen wegen nicht leicht ist, hat man sich vorzusehen, auch nicht die geringste Bewegung zu machen.

Mit diesen Augen scheint die Moeglickeit zu uebertriebener Tiefensicht (grosse Sehwinkel stereoskopischer Sehbilder) gegeben zu sein, wodurch wirkliche Zeiteinheiten einer Bewegung auch sehr vergroessert werden.

Die uebrige technische Sehapparatanlage laesst diese Annahme wahrscheinlich sein: so sind die Ommatidien, die in der vorderen Netzaugenflaeche liegen, im Verhaeltnis zur Gesamt-Ommatidia-Zahl in der Mehrheit. Die Sehachsenverlaengerungen aus korrespondierenden Ommatidien schneiden sich innerhalb ihres Sehraumes. Die Netzaugen dieser Fliegen haben auch die Form leicht elliptischer

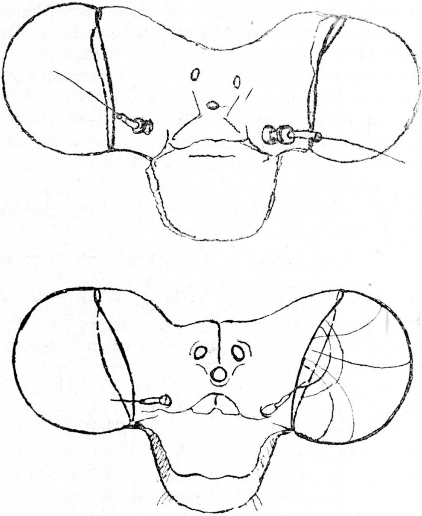

Abb. 3

Megaloprepus coeruleatus (Drury)

Paraboloide, wodurch erreicht ist, dass sich noch weitere Ommatidien Sehachsen, wie oben gezeigt, schneiden. Die elliptischen Querschnitte, mit dem groesseren Radius nach vorn gelegen, steigern diese Ommatidialage noch mehr. Der rueckwaerts gelegene Teil des Netzauges dagegen ist bezeichnenderweise nur mit wenigen Ommatidien versehen, deren Aufgabe es sein mag, nach allen Seiten hin zu sichern.

Endlich kommt noch eine gewinkelte Stielanlage dazu, deren kleinerer Winkel zwischen 170 und 160 Grad nach vorn gelegen ist, was weiterhin eine Sehachsenverschneidung beguenstigt.

Diese merkwuerdigste aller Fliegen lebt meist in Baumkronen, kommt auch bei nahe am Walde gelegenen Siedlungen bis in die Gebuesche herunter. Nur das Maennchen hat diese gestielten Augen, die des Weibchens sind voellig normal.

Das Maennchen ist immer auf nackten, schweissabsondernden Hautstellen zu finden, beschaeftigt solche Fluessigkeit aufzusaugen, das Weibchen sitzt auf Bluetendolden Pollen oder Nektar suchend. Diese Ernaehrungsgegensaetze moegen die verschiedenen Augenanlagen begruenden, etwa beim Maennchen eine Art Sicherung. Nackte Hautstellen bei waldbewohnenden Tieren sind zu empfindlich, um Belaestigungen durch Muecken zu dulden und da ist ein schnelles Erkennen zuschlagender Bewegung von Vorteil.

Es ist ganz unmoeglich, eine auf einer Hand sitzende Richardia mit der anderen Hand zu fangen, was etwa bei einer Stubenfliege keine Schwierigkeiten bereitet.

Deutliche und einwandfreie Ergebnisse der Wirkungsweise gestielter Netzaugen ergaben sich bei den erwaehnten Waldlibellen, Mecistogaster-Pseudostigmatidae. Beim Senkrechtflug entlang der aeusseren Blattwand einer guenstig gewachsenen Baumkrone, bleibt der von schwirrenden Fluegeln langsamgehobene oder gesenkte Libellenkoerper von den aeusseren Blaettern immer nur wenige Zentimeter entfernt. Sieht das Auge ein Insekt, das sich durch noch so kleine Bewegung verraten hat, bleibt der kleine Helikopter in der Luft schwebend stehen. Langsam wird der Leib geschwenkt, bis er genau rechtwinklig zu einem bestimmten Blatt eingestellt ist. Sehr behutsam und kaum bemerkbar kommt die Libelle bald naeher, bald entfernt sie sich wieder: es wird Abstand eingestellt.

In vieler Hinsicht vergleichbar dem Einstellen eines Photo-Apparates mit Mattscheibe!

Dann, unglaublich schnell, dem Zupicken eines Vogelschnabels gleich, schnellt die Libelle auf's Blatt.

Eine glaenzende Skorpionspinne, musste eine geringe Bewegung mit ihrem Leben bezahlen.

Im Schwebeflug wird sie verzehrt und die energieverbrauchende Jagd der Libelle geht weiter.

Das gestielte und nach vorn gewinkelte Auge muss im geringen Sehbezirk jede Bewegung sehen koennen. Das schnelle Zugreifen erlaubt weder grosse Entfernungen noch den geringsten Irrtum im Entfernungabschaetzen. Der Abstand vom Libellenkopf bis zur kleinen Beute muss auf das Genauste gesehen werden koennen.

Ermoeglichen die Laenge und die Winkelung der Stielachsen zugleich das genaue Abstandmessen, so muss die Stielung bei allen der zahlreichen Arten dieser Waldlibellen eine einheitliche sein, denn im Wald gibt es nur eine Moeglichkeit auf diese Weise zu jagen.

Erkennen der Bewegung im Raum: Jede vorstellbare und jede ueberhaupt moegliche Bewegung eines Gegenstandes im Raum, sobald er in das Sehsphaeroid eines Netzauges geraet, dort Platz hat (also genuegend klein ist), muss von irgend einem der Ommatidien dieses Netzauges aufgenommen werden.

Sollte das Bild eines gegen den hellen Himmel wahrnehmbaren kleinen und schnellbewegten Koerpers von einem menschlichen Auge gesehen werden, ist dies vom Zutreffen einer Reihe guenstiger Einstellungen abhaengig. Das Auge muss sich gerade im richtigen Augenblick auf die richtige Stelle eingestellt haben, um im besten Falle das kurze Erscheinen eines fluechtigen Striches aufnehmen zu koennen. Wirkliches Erkennen eines so "gesehenen" Objektes und ihm folgen ist unmoeglich, es beruht im besten Falle auf Wissen.

Bewegung ist Aufeinanderfolge und ohne den Zeitbegriff nicht vorstellbar. Der Zeitbegriff jedoch ist das Ergebnis einer Vernunftfunktion. Das Insekt kann Vernunft nicht besitzen, es kann also aus Anschauung, Vergleichen mit Begriffen und anderen Anschauungen nichts formen, was Bewegung bewusst werden liesse.

Es ist demnach zu untersuchen, wie ein Uebermittlungsmechanismus das Bild eines Objektes dem Sehzentrum eines Insektes so zu uebertragen vermag, dass nicht nur dieses Objekt wahrgenommen ist, sondern zugleich auch alle jene Beziehungen mit uebermittelt werden, die soweit ein Bewusstwerden ermoeglichen, als es die Lebenerhaltung des Insektes erfordert.

Wird nur eine reine Lebenerhaltung in Betracht gezogen, und eine solche ist bei Wesen ohne Vernunft allein gefordert, ist eine mechanisch bedingte Erkenntnis wertvoller, als jede, die sich durch Vernunftsfunktionen begruendet.

Vernunftsbedingtes Erkennen muss veraenderlicher Faktoren wegen, wie individuelle Anschauung und ebensolchen Vergleichens mit anderen Anschauungen etc., also eine Summe verschiedener Moeglichkeiten zweiten Ranges, immer auf das Leben bezogen, vieldeutig werden. Erkenntnis aber, die auf rein mechanische Faktoren gegruendet ist (so sollte man bei den Insekten den Instinkt definieren), unterliegt hoechstens den Fehlern einer individuellen Intelligenz, die als mechanische Intelligenz nur eines individuell vollkommeneren oder fehlerhafteren Apparates wegen zu variieren vermag.

Solche individuelle Fehlerhaftigkeit mechanischer Intelligenz wird immer und von selbst in engen Grenzen bleiben muessen, da jeder groessere Fehler von vornherein aus seinen Existenz-Ursachen heraus seinen Traeger vernichtet.

Es ist einzusehen, dass Erkenntnis ohne Vernunft aber mit Vernunftergebnis immer auf komplizierte mechanische Art zu erhalten sein wird und reinen Vernunftsergebnissen nur angenaehert entsprechen kann. (Dies suggeriert, auch die menschliche Vernunft biologischer zu sehen).

Bewegt sich das in den Sehraum eines Netzauges gelangte Objekt rechtwinklig zur Sehachse eines Ommatidiums, das der Kugelgestalt des Netzauges wegen das dem Objekt naechstgelegene ist, so wird beim Durcheilen des Sehkegels die wirkliche Geschwindigkeit der Bewegung dem zugehoerenden Sehzentrum uebertragen.

Wegen der Kleinheit eines Sehfeldes und der Begrenztheit des zugeordneten Sehraumes, also des Sichtabstands des Objektes vom Ommatidium, kann die Bewegungsbahn des Gegenstandes sich kaum mehr als ein "Punkt" abbilden. Diesem punktfoermigen Bild des Objektes folgt unmittelbar das zweite, das aus dem Sehfeld vom anliegenden Ommatidium aufgenommen ist.

Die Kugelgestalt des Netzauges bedingt ein Abweichen von der anfaenglichen Rechtwinkelstellung der Flugbahn zur Sehachse, beim Einstellen zur Sehachse des benachbarten Ommatidiums. Das zweite gesehene Bild ist vom ersten verschieden, weil das Objekt im neuen Sehfeld etwas laenger verweilen muss, das Bild wird sich als uncharfer Punkt darstellen. Die wirklich stattgefundene Bewegung des Objektes zeigt sich im Sehzentrum, das als eine unbegrenzte helle Flaeche im Falle der frei im Raum fliegenden Libelle erkannt wurde, als einfache Platzveraenderung an, als zwei getrennte Aufnahmen, die aufeinander folgen.

Bleiben die Bewegungsrichtung des Objektes und seine Eigengeschwindigkeit unveraendert, wird das Verweilen jeder uebertragenen Aufnahme im Sehfeld ein immer laengeres. Dies entspricht den zunehmenden Differenzen der Tangenswerte der gleichbleibenden Sehwinkel der Ommatidien. Die anfaenglich rechtwinklig zur Sehachse gelegene Bewegungsbahn des Objektes kommt zunehmend schiefer zu den Sehachsen der benachbarten Ommatidien zu liegen. (Abb. 4). Es werden zunehmend laengere Strecken der Bewegungsbahn von den aufeinanderfolgenden Sehwinkeln erfasst, was sich im Zentrum als immer laengeres Verweilen ausdrueckt. Oder: je weiter sich das Objekt entfernt (immer unter den genannten Bedingungen), um so langsamer bewegt es sich fuer den Netzaugentraeger. Die Aufeinanderfolge der Bilder im Sehzentrum verzoegert sich zunehmend, nicht als Folge der wirklichen Bewegungszeit, sondern als Folge der Bewegungsrichtung auf das unbewegte sehende Netz-

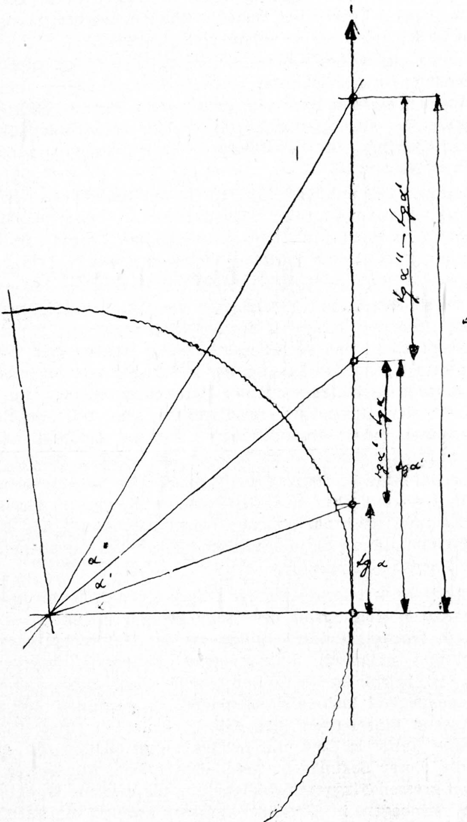

Abb. 4

auge bezogen. Grosse oder gar unendliche Tangenswerte koennen im beschraenkten Sehsphaeroid nicht aufgenommen werden, obgleich sie einer wirklichen Flugbahn entsprechen wuerden.

Das notwendigerweise Hintereinander-Erscheinen in Form einzelner, voneinander abgetrennter Aufnahmebilder (jedes Ommatidium hat seinen eigenen Nerv und damit seine eigene Leitung) ist nichts anderes, als eine spezifische Art von Zeiterkenntnis: die mechanische Darstellung des Zeitbegriffes fuer einen spezifischen Traeger eines Netzauges.

Die Faktoren Zeit und Geschwindigkeit, miteinander vervielfacht, ergeben einen bestimmten Weg. Davon stellt die Geschwindigkeit einen praktischen Wert dar, denn sie ist an ein Objekt gebunden, das in bestimmter Zeit eine gewisse Strecke durcheilt.

Dieser Vorgang kann der Unfaehigkeit der Insekten wegen, sich abstrakte Vorstellungen zu schaffen, nur mechanisch ersetzt werden. Also der mechanische Zeitbegriff der Insekten kann fuer lebensnotwendige Dinge allein und damit nur begrenzt angewendet werden, was durch viele eigenartige Formen der Netzaugen mit bewiesen ist. Das mechanische Uebertragen einer Bewegung erlaubt nur ein Geschehen in der Gegenwart, mechanische und rein praktische Begriffe koennen durch Abstraktionen nie selbst abstrakt werden, und es kann nie der Begriff einer Zeit an sich gebildet sein.

Das mechanische Erschaffen des Zeitbegriffes ist automatisches Werden eines Augenblickes aus den vorhergegangenen, das Sehen einer Erscheinung nach der gleichen vorhergesehenen, das Sehen mit einem Ommatidium als mechanische Folge des Gesehenen mit einem der Nachbar-Ommatidien.

In der Undefinierbarkeit der Dauer eines Augenblickes und der definierbaren Endlichkeit des "sehr kleinen Augenblickes" bei den Insekten bezueglich der Sehfolge, ist der Unterchied zwischen abstraktem und praktisch mechanischem Zeitbegriff begruendet. Immer aber ist, beispielsweise bei den Libellen, das Zeitmass so klein, um einen genuegend kleinen "Augenblick" zu gewinnen, bei mehr als zehntausend Einzelaugen wird der im Bruchteil einer Sekunde durchmessene Raum in Zeit und in Bewegungsteile zerlegt, die in Tausendsteln dieser Sekunde zu geschehen haben. Ein Betrag, der sich bei den grossen Fluggeschwindigkeiten, die manche Insekten zu entwickeln vermoegen, in Zeitteilen sichtbar anzeigt, die auch eine moderne Kamera kaum erreicht, das menschliche Auge aber niemals sehen kann. Fehlt dagegen Bewegung, hat das Insekt auch keinen Zeitbegriff. Wird, wie erwaehnt, bei angenommener geradlieniger

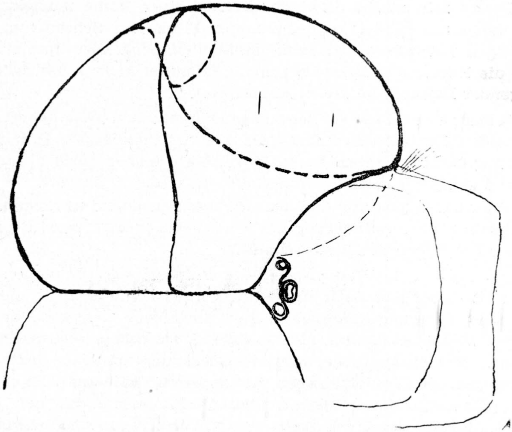

Abb. 5

Anisoptera Libellulidae (Palpopleurinae) Gynacantha gracilis (Burmeister)

Flugrichtung, die zu einer Sehachse eines Netzauges rechtwinklig verlaeuft, die Bewegungsstrecke von einem Ommatidium-Sehfeld zum benachbarten, als Wert goniometrischer Tangens-Differenzen der Sehwinkel, fortlaufend und zunehmend groesser, so verweilt das Objekt zunehmend laenger in diesen aufeinanderfolgenden Sehfeldern.

Im Bewusstsein erscheint jedes neue Einzelbild von zunehmender Dauer. Dies bedeutet fuer das Insekt ein zunehmendes Verringern der Objekt-Geschwindigkeit, ein Steigern der Zeitdauer obgleich die Bewegung unveraendert ist.

Der Weg des Objektes wird auf der Aufnahmeflaeche des Netzauges als seine Projektion abgebildet, der wirklich geflogene Weg, geht er nicht rechtwinklig zum Seh-Ommatidium, erscheint verkuerzt.

Oder: je nach dem Einfallwinkel bleibt das Objekt mehr oder weniger lang im Sehfeld immer weniger Ommatidien, was im Bewusstsein einer ebenso mehr oder weniger schneller oder langsamer werdenden Bewegung gleichkommt.

Dieses rein mechanische Erscheinen einer Reihe nacheinander sich abbildender sehr kleiner dunkler Flecke im Sehzentrum, uebertragen vermittels einer Reihe zusammenhaengender Ommatidien, gibt die Erklaerung fuer das sichere Erbeuten kleiner und schnellfliegender Insekten im freien Raume ab.

Wieder eine Libelle als Beispiel genommen: zum Fang des schnellfliegenden Beuteinsektes muss die Libelle automatisch ihre Flugrichtung derart nehmen, dass das Verfolgte immer laenger und immer in weniger einzelnen Ommatidien-Sehfeldern verweilt.

Oder der mechanischen Libellenzeit entsprechend so fliegen, dass eine Bewegungsverminderung des Verfolgten eintritt, dass die Beute immer langsamer zu fliegen scheint.

Ist endlich die Verkuerzung der Flugbahn als Punkt gesehen, dann ist dieser nur noch in einem Ommatidium-Sehfeld sichtbar und jede Bewegung aufgehoben. Fuer die Libelle steht die Beute im Raume still und sie hat nichts anderes zu tun, als mit Hoechstgeschwindigkeit zu fliegen und ist diese der Schnelle der Beute ueberlegen, ist das Beuteinsekt bald von den Greifzangen des Libellenkopfes ergriffen. Bei groesserem Flugvermoegen der Beute verschwindet schnell der stillstehende Punkt aus dem Sehfeld des Libellen-Ommatidiums.

Somit ist gezeigt, wie Libellen mittels ihrer komplizierten Netzaugen mechanisch, aber eindeutig und deswegen sicher, sich in der Luft von schnellfliegenden und kleinen Insekten ernaehren koennen.

Es erklaeren sich auch die geometrischen Flugbahnen: bedingt durch das Netzauge fliegt die Libelle derart hinter ihrer Beute her, welchen Weg diese im Raum auch waehle, dass die Flugwegprojektion sich auf immer weniger Ommatidien abbildet. Dieses Fliegen zeigt deshalb immer geometrische Raumkurvem reinster Art.

Die Form der Ommatidien ist durch eine sechseckige Abgrenzung bestimmt. Da jedoch, wie schon bemerkt, die Gesamtform des Netzauges von der Gestalt geometrischer Koerper abweicht, ist eine Aufteilung der Koerperoberflaeche in regelmaessige Sechsecke nicht durchgaengig durchfuehrbar. Der Bildung ausgleichender Flaechenteile wegen sind Reihen dreieckiger bis siebeneckiger Ommatidien unvermeidbar und diese sind keineswegs regelmaessig abgegrenzt.

Da nun das Netzauge nicht die Aufgabe hat, groessere Gegenstaende sehen zu muessen, spielt die Ommatidienabgrenzung auch keine Rolle. Eine allgemein sechseckige Abgrenzung ist nur durch die Technik des Netzaugenbaues bedingt, auch bei unregelmaessigen

Abgrenzungen sind die Bewegungen kleiner Koerper gleich gut aufnehmbar.

Durch ein Einfetten der Ommatidialinsen kann bei seitlichem Belichten die Linsenkruemmung in einfacher Weise festgestellt werden. Es zeigt sich dabei noch, dass auf den einzelnen Linsen von einem Objekt nicht etwa nur ein Teil, sondern das ganze Objekt mitsamt der Umgebung abgespiegelt ist und dehalb auch aufgenommen wird, wie dies bei jedem andern Auge grundsaetzlich auch der Fall ist. Auch deswegen ist ein mosaikartiges Sehen ausgeschlossen.

Objekte ohne Bewegung erwecken kein Interesse, sie koennen im besten Falle hell oder dunkel gesehen werden und dies genuegt beim Fliegen, um Zusammenstoesse zu vermeiden, die, fliegen Libellen nicht im gewohnten Raum, trotzdem oft genug geschehen.

Im Amazonaswald leben Libellen mit grosslinsigen Netzaugen und die mit grosser Geschwindigkeit fliegen. Sie jagen in der Daemmerung und einbrechender Nacht ueber dem Wald um Baumkronen herum. Aus Lichtscheue verstecken sie sich tagueber unter bodennah wachsenden grossen Blaettern und aehnlichen dunkeln Orten, dort koennen sie oft in Mengen aufgestoebert werden. Dann stuermen sie blindlings davon, rennen an jeden Baum an, wie dick er auch sei und nicht wenige fallen benommen zur Erde (*Gynacantha gracilis* Burm). (Abb. 5).

RESUMEN

El funcionamiento del ojo compuesto del insecto es totalmente distinto del del ojo sencillo.

Con el ojo compuesto cualquier movimiento en el espacio —desde el momento en que se encuentra dentro de la esfera visual— puede ser interpretado correcta y unívocamente. Ello demuestra y comprueba que, en general, el reconocimiento como juicio no ha de ser necesariamente una función de la razón humana.

El ojo compuesto divide lo percibido en partes muy pequeñas que se siguen automáticamente, obteniendo así un propio concepto del tiempo. Este permite (cualquiera que sea el movimiento en el espacio) solucionar con la objetivación de la fórmula: tiempo por camino, el problema de alcanzar con seguridad un objeto que vuela rápidamente en el libre espacio.

La línea que describe el vuelo, sea tan curva como fuere, se proyecta sobre la superficie de los ommatidia, siendo transmitida de un ommatidium al otro, sucesivamente, a un centro visual.

Este centro visual dirige el propio vuelo de manera que el retrato del objeto permanece visible por un tiempo cada vez más largo en un siempre menor número de ommatidia.

Esto significa para el insecto cazador: la presa se mueve de acuerdo con su tiempo, es decir, cada vez más lento.

Si finalmente no queda visible sino en un solo ommatidium, la presa, aparece como inmóvil y así puede ser cogida.

Resulta de lo anterior que el insecto cazador ha de moverse de tal manera que la línea de vuelo del objeto perseguido se proyecte en el ojo compuesto de su perseguidor en forma cada vez más rectangular.

El método visual automático garantiza una alimentación segura por la caza de presas pequeñas de vuelo rápido en el libre espacio.